

表層部における堆積軟岩の水理・物質移行特性 データの取得

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2005年 3月

大成建設株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2005

2005年3月

表層部における堆積軟岩の水理・物質移行特性データの取得

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

下茂道人*、熊本創*

要旨

幌延深地層研究計画では、これまで開発してきた安全評価手法の適用性評価を計画している。安全評価手法の適用にあたっては、地下深部から地表にいたる構成物質（岩盤（基質部分、亀裂部分）、表層部（風化部、表土））の物質移行特性が必要となる。本件は、このうち表層に近い部分の岩盤風化部からコアを採取し、室内試験結果から表層部分の物質の移流・分散・拡散に関する水理特性および物質移行特性を把握するものである。

室内試験では、幌延深地層研究センターの試錐孔（H16-1-02、H16-1-07、H16-1-15）で採取された表層コア試料について、基本的な物性を測定するとともに、透水試験、拡散試験を実施し、水理・物質移行に関わるデータを取得した。また、昨年度までに核燃料サイクル開発機構東海事業所で実施された深部堆積岩試料（核燃料サイクル開発機構幌延深地層研究センターがH15年度までに実施した試錐調査で得られた試料：勇知層、声問層、稚内層）の試験結果との比較を行い、得られた知見についてまとめた。

その結果、表層部の透水係数は、 8.0×10^{-10} (m/s) ～ 2.0×10^{-9} (m/s) 程度であり、勇知層、声問層の透水性よりもやや大きい値であることが分かった。また、実効拡散係数は、 1.5×10^{-10} ～ 3.5×10^{-10} (m^2/s) であり、勇知層、声問層の値とほぼ同等の値であることが分かった。

本報告書は、大成建設(株)が、核燃料サイクル開発機構の依頼により実施した研究成果である。

核燃料サイクル開発機構担当部課室：幌延深地層研究センター 深地層研究グループ

*：大成建設（株）技術センター土木技術研究所

March, 2005

Data acquisition for hydrology and mass transport properties of sedimentary rocks in subsurface layer

Michito Shimo^{*}、Sou Kumamoto^{*}

Abstract

The objective of this study is to understand hydraulic and mass transport properties of sedimentary rocks at shallow depth.

In this study, a series of laboratory hydraulic and tracer tests using sedimentary rock specimens in subsurface layer obtained from H16-1-02, H16-1-07 and H16-1-15 boreholes at Horonobe Deep Underground Reserch Center were conducted.

The transient pulse method was used for the hydraulic tests, whereas the through diffusion method was used the diffusion tests. In the diffusion tests, Potassium iodide was used as a tracer.

The obtained hydraulic conductivities varied between 8.5×10^{-10} m/s and 2.0×10^{-9} m/s . The effective diffusion coefficients obtained from the through diffusion test were 1.5×10^{-10} m²/s to 3.5×10^{-10} m²/s.

Work performed by Taisei Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC Liaison: Geotechnical Science and Engineering Group, Horonobe Underground Research Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

^{*} : Technology Center, Taisei Corporation

目 次

1. はじめに	1
2. 研究概要	2
2.1 研究の目的	2
2.2 研究の内容	2
3. コア試料を対象とした透水試験、トレーサー試験	4
3.1 コア試料の採取、整形	4
3.2 コア試料の基本物性試験および分析	7
3.3 コア試料を対象とした透水試験	16
3.4 コア試料を対象としたトレーサー試験	27
4. 試験結果のまとめ	34
5. 軟岩中の流れと移行現象の概念モデルの適用性検討	35
5.1 概念モデル化の検討	35
5.2 物性値の取り扱いに関する検討	35
6. おわりに	36
参考文献	37

目 次

図 2.2- 1	研究のフロー	2
図 3.2-1	X線分析結果 (H16-1-02)	12
図 3.2-2	水銀圧入法による細孔径分布測定結果 (H16-1-02)	15
図 3.2-3	水銀圧入法による細孔径分布測定結果 (深部堆積岩との比較)	15
図 3.3-1	トランジェントパルス透水試験装置概要	17
図 3.3-2	トランジェントパルス法測定原理	18
図 3.3-3	トランジェントパルス透水試験手順	18
図 3.3-4	Hsieh 法による解析手順の概念図	21
図 3.3-5	トランジェントパルス透水試験結果 (H16-1-02)	23
図 3.3-6	トランジェントパルス透水試験結果 (H16-1-07)	24
図 3.3-7	トランジェントパルス透水試験結果 (H16-1-15)	25
図 3.3-8	透水試験結果 (深部堆積岩試料との比較)	26
図 3.3-9	有効空隙率と透水係数との関係 (深部堆積岩との比較)	26
図 3.4-1	拡散実験装置概要	28
図 3.4-2	拡散実験装置および供試体の概観	28
図 3.4-3	拡散試験結果 (H16-1-02)	32
図 3.4-4	拡散試験結果 (H16-1-02)	32
図 3.4-5	拡散試験結果 (H16-1-02)	33
図 3.4-6	実効拡散係数と有効空隙率との関係 (既往データとの比較)	33

表 目 次

表 3. 1-1	試料採取一覧	4
表 3. 2-1	試料分析項目一覧	7
表 3. 2-2	コア試料基本物性試験結果一覧	8
表 3. 2-3	深部コア試料基本物性試験結果一覧 (H14、H15 年度 JNC 東海事業所実施)	8
表 3. 2-4	X 線分析結果一覧	11
表 3. 2-5	水銀圧入試験結果一覧	14
表 3. 3-1	トランジェントパルス透水試験ケース	19
表 3. 3-2	トランジェントパルス透水試験法で用いた既知パラメーター一覧	22
表 3. 3-3	トランジェントパルス透水試験結果一覧	22
表 3. 3-4	深部堆積岩の透水試験結果 (H14、H15 : 核燃料サイクル開発機構東海事業所)	22
表 3. 4-1	拡散試験ケース	29
表 3. 4-2	試験条件一覧	29
表 3. 4-3	拡散試験結果一覧	31
表 3. 4-4	拡散試験結果一覧 (H14、H15 : 核燃料サイクル開発機構東海事業所)	31
表 4. 1	室内試験結果一覧	34

写真目次

写真 3.1-1	整形後の試験用試料 (H16-1-02 孔)	5
写真 3.1-2	整形後の試験用試料 (H16-1-07 孔)	5
写真 3.1-3	整形後の試験用試料 (H16-1-15 孔)	6
写真 3.3-1	トランジェントパルス透水試験装置概観	17

1. はじめに

幌延深地層研究計画では、これまで開発してきた安全評価手法の適用性評価を計画している。安全評価手法の適用にあたっては、地下深部から地表にいたる構成物質（岩盤（基質部分、亀裂部分）、表層部（風化部、表土））の物質移行特性が必要となる。

本件では、このうち表層に近い部分の岩盤風化部における物質の移流・分散・拡散に関する水理特性および物質移行特性を把握することを目的とし、風化部コア試料について、基本的な物性を測定するとともに、室内透水試験、拡散試験を実施し、水理・物質移行に関わるデータを取得する。

2. 研究概要

2.1 研究の目的

本研究は、風化堆積岩中における物質移行特性の解明を目的とし、コア試料を対象とした室内試験を行うものである。

2.2 研究の内容

本研究の実施項目は、以下のとおりである。

- (1) コア試料を対象とした透水試験、トレーサ試験
- (2) 軟岩中の流れと移行現象の概念モデルの適用性検討

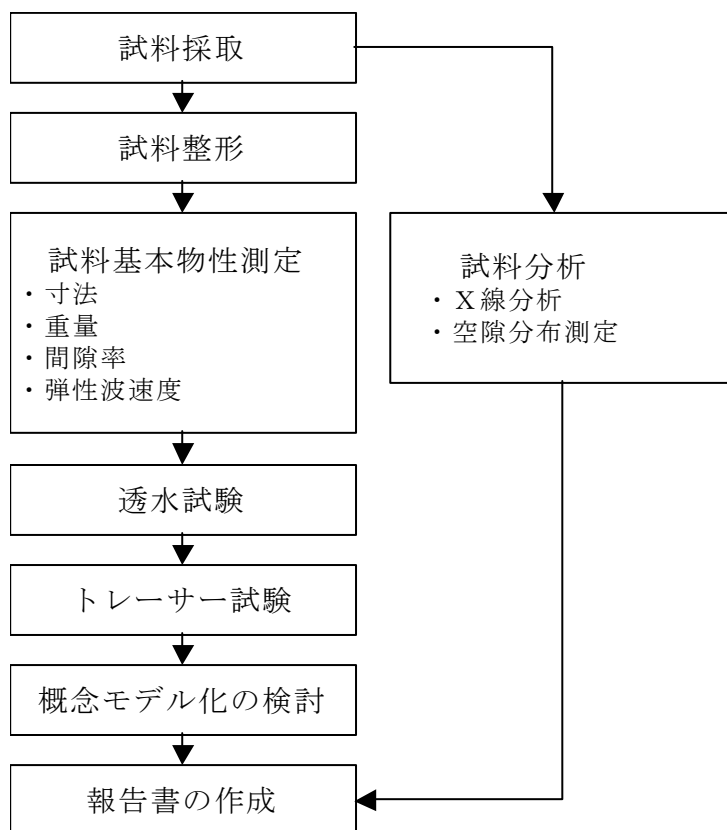


図 2.2-1 研究のフロー

(1) コア試料を対象とした透水試験／トレーサ試験

試験に用いる試料は、幌延深地層研究センターの試錐孔で取得された岩芯から、インタクト試料を採取した。

試験は、原位置地下を模擬した条件下での透水試験および非収着性のトレーサー試験を実施する。試験方法は、透水試験をトランジェントパルス法にて行い、トレーサー試験は、移流を考慮しない拡散試験を行う。試験から得られるデータを解析し、透水係数ならびに拡散係数を求める。

(2) 軟岩中の流れと移行現象の概念モデルの適用性確認

昨年度までに核燃料サイクル開発機構東海事業所にて実施された、深部堆積岩試料（核燃料サイクル開発機構が H15 年度までに実施した試錐調査で得られた試料：勇知層、声問層、稚内層）の試験結果と本業務で実施した試験結果を比較し、表層部堆積層における物質移行の概念モデルについて検討を行う。

3. コア試料を対象とした透水試験、トレーサ試験

3.1 コア試料の採取、整形

北海道幌延町にある核燃料サイクル開発機構幌延深地層研究センターが平成16年度に掘削した試錐孔（H16-1-02、H16-1-07、H16-1-15）において、透水試験およびトレーサ試験用の試料を採取した。採取方法を以下に記す。

3.1.1 コア試料の採取

採取孔および深度を表 3.1-1 に示す。核燃料サイクル開発機構幌延深地層研究センターが、平成16年度に実施した浅層試錐の結果から、当該箇所（H16-1-02）の風化部は、酸化帯（完全に色が抜け黄褐色～赤褐色になった部分で水酸化鉄や硫酸化鉄が見られるところ）と、その下位に位置する溶解帯（暗緑灰色で、鉱物間の固結部分が溶脱しているようなところ）から構成されていることがわかっている。またこれらの空間的な広がりから、酸化帯はほとんど不飽和に近い状態の中で形成され、溶解帯は地下水面下で形成された可能性が高いこともわかってきている。また、本件の目的は、地下から地表部付近までの物質移行評価に資するデータを取得することであるため、完全な不飽和帯と想像される酸化帯のデータを取得する必要性はあまり高くはないと考えられる。

以上のことから、今回のコア試料の採取では、風化部の内、地下水位以深に位置する溶解帯を対象として行った。試料の採取は、浅層試錐が無水で掘削されているため、試験に使用可能な棒状の試料が得られにくい状況であったことから、試験可能な棒状のコアをできるだけ多く採取することを第一方針として実施した。なお、当該試料は、上述にあるように無水掘削により得られたものであるため、非常に崩れやすい。そのため、コアの輸送および保管に際しては、乾燥や衝撃によるコア試料の破損を防ぐため、ラッピングと緩衝材による衝撃対策を行った。

表 3.1-1 試料採取一覧

試錐孔名	採取深度 (GL. - m)	採取長 (m)
H16-1-02	11.40 ~ 13.00	1.6
H16-1-07	27.80 ~ 29.00	1.2
H16-1-15	11.50 ~ 13.00	1.5

3.1.2 コア試料の整形

試験に必要となる試料寸法は、透水試験では、直径 50mm×高さ 50mm、拡散試験では、直径 30mm×高さ 5mm である。採取した試料は、無水掘削によりコア径が細くなっている部分もあるが、直径が 50mm よりも多少大きい部分が見られた。そこで、試験試料は、この部分をコア軸方向に試験用の寸法に削り出して整形した。写真 3.1-1～写真 3.1-3 に、整形後の透水試験用試料の外観を示す。



写真 3.1-1 整形後の透水試験用試料 (H16-1-02 孔)



写真 3.1-2 整形後の透水試験用試料 (H16-1-07 孔)



写真 3.1-3 整形後の透水試験用試料 (H16-1-15 孔)

3.2 コア試料の分析

3.2.1 分析項目

試料採取を実施した各試錐孔につき 1 試料を対象とし、基本的な物性値（比重、有効空隙率、弾性波速度）の測定ならびに以下の 2 点を目的とした、試料分析を行った。

- ①試料の鉱物組成を把握すること
- ②試料の空隙分布を把握すること

①に関しては、粉末式 X 線分析を行い、②に関しては、水銀圧入法による空隙の細孔径分布測定を行った。

測定ならびに分析の実施項目ならびに数量を表 3.2-1 に示す。

表 3.2-1 試料分析項目一覧

試験項目		数量	備考
基本物性試験	比重試験	3試料	透水/トレーサー試験に使用した全ての試料について実施
	含水比試験		
	飽和度		
	有効空隙率		
	吸水率		
	弾性波速度		
X線分析	粉末X線分析	1試料	H16-1-02孔試料について実施
空隙分布測定	水銀圧入法	1試料	

3.2.2 基本物性試験

基本物性試験の結果一覧を表 3.2-2 に示す。また、昨年度までに核燃料サイクル開発機構東海事業所で実施した深部堆積岩の基本物性試験の結果を表 3.2-3 に示す。基本物性測定は、試料採取を実施した各試錐孔のそれぞれの物性を把握することを目的として、試料採取を実施した全ての試錐孔について行った。なお、基本物性試験用の試料は、透水試験、トレーサー試験用試料の整形後に残ったごく近傍の岩片から採取した。

今回の測定においては、乾燥密度は 0.95g/cm^3 程度、有効空隙率は 60%程度であり、深部堆積岩での測定結果と比べると、声間層の 200m 付近で採取された試料（HDB-6 孔より採取）とほぼ同等の値を示している。なお、弾性波速度測定の内、S 波速度については、今回の試料では明確な初動が見られず測定不能であった。また、H16-1-07 孔試料については、他の 2 試料とやや異なる値を示しているが、これは前節の試料写真からも分かるように、他の 2 試料とは色調が異なっており、より酸化帯に近い試料であるためと考えられる。

表 3.2-2 コア試料基本物性試験結果一覧

採取孔名	深度(m)	比重(g/cm ³)			有効空隙率(%)	吸水率(%)	弾性波速度(km/s)	
		自然状態	強制乾燥状態	強制湿潤状態			P波速度	S波速度
H16-1-02	10	1.558	0.956	1.558	60.2	63.0	1.91	-
H16-1-07	30	1.447	0.775	1.447	67.3	86.8	1.83	-
H16-1-15	10	1.553	0.947	1.553	60.7	64.1	1.95	-

※ 強制乾燥状態：供試体を 110℃の乾燥炉内で、24 時間以上乾燥させた状態。

※ 強制湿潤状態：供試体を水中につけ、10 日間以上真空引きした状態。

表 3.2-3 深部コア試料基本物性試験結果一覧 (H14、H15 年度 JNC 東海事業所実施)

試料名称	深度(m)	地層名	比重(g/cm ³)			有効空隙率(%)	吸水率(%)	弾性波速度(km/s)	
			自然状態	強制乾燥状態	強制湿潤状態			P波速度	S波速度
HDB-7	190	勇知層	1.917	1.470	1.917	44.7	30.4	1.78	0.44
	190		1.882	1.413	1.882	46.9	33.2	1.8	0.41
	230		1.921	1.475	1.921	44.5	30.2	1.76	0.36
	230		1.935	1.495	1.935	44.0	29.4	1.78	0.38
	240		1.893	1.429	1.893	46.3	32.4	1.72	0.34
	240		1.907	1.451	1.907	45.7	31.7	1.71	0.32
HDB-6	200	声問層	1.574	0.978	1.574	59.5	60.9	1.68	0.43
	200		1.568	0.970	1.568	59.8	61.7	1.70	0.46
	200		1.570	0.974	1.570	59.6	61.3	1.68	0.48
	250		1.699	1.177	1.699	52.2	44.3	1.85	0.46
	250		1.679	1.145	1.679	53.4	46.6	1.87	0.59
	250		1.675	1.138	1.675	53.7	47.2	1.93	0.40
HDB-4	200	稚内層	1.879	1.465	1.879	41.4	28.3	2.7	0.98
	300		1.91	1.526	1.91	38.5	25.2	2.8	1.12
	300		1.911	1.527	1.911	38.4	25.2	2.7	1.1
	450		2.005	1.673	2.005	33.2	19.9	2.6	1.15

3.2.3 X線分析

対象試料である試料の構成鉱物の同定を目的として不定方位法、定方位法によるX線分析を行った。分析は透水試験、トレーサー試験用の試料を整形したごく近傍から岩片を採取して行った。

(1) 原理

X線回折 (X-ray diffraction, XRD) は、鉱物の結晶構造に関する情報を得るための分析方法であり、試料に含まれている元素の種類や量を知るための方法ではない。この分析法は試料中の原子の配列の規則性、すなわち結晶相であることを前提にしている。

結晶体に単色のX線を当てると、X線が結晶格子面で反射し、お互いに干渉しあうので、次の条件を満たす方向の回折線のみ強度が増大し、他は打ち消しあって観察されない。

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

dは面間隔、 λ は波長、nは干渉しあう波の位相の差である。n=0,1,2,・・・の場合をそれぞれ0次、1次、2次・・・の回折線と呼ぶ。波長 λ が一定の単色X線を照射して θ (2θ)を観測し、上の式から面間隔が求められる。この面間隔は一般に物質の固有の値で、一つの物質の数個のdとそれに対応する回折X線の相対強度が観察できれば、その物質を同定することができる。

X線回折には多くの方法があり、粉末回折法 (powder diffraction method) が通常適用される。鉱物はそれぞれに特有の回折線を示し、回折線の位置と強度から各鉱物の鑑定がなされる。つまり、X線回折により鉱物の同定が可能である。具体的には、粉末試料の回折実験によって得られたX線回折結果を既知物質のそれと比較し、未知物質を同定する。

通常の粉末法では不定方位法を用い、あらゆる方向に配列した結晶粉末からのX線回折を測定する。不定方位法により試料に含まれる鉱物種の同定が可能であり、そしてそのおおよその量も知ることができる。

(2) 不定方位法

不定方位法は粉末法とも呼ばれるX線回折法であり、試料の造岩鉱物を同定することを目的として行われる。不定方位法では、あらゆる方向を示す配向性のない粉末試料からのX線回折を行う。試料をめのう乳鉢を用い、指でさわったときに“粒子の感じ”がなくなるまで ($4\mu\text{m}$ 以下) 粉砕する。粉末にした試料は、穴のあいた ($20\times 14\times 1.5\text{mm}$) アルミニウム板製試料ホルダーにつめこみ、測定に供する。得られたデータを既知のX線回折データと比較し、含有される鉱物の種類を決定する。ただし、複雑な混合物の場合には同定が困難である。そのような場合や粘土鉱物については、さらに定方位法で検討する必要がある。

(3) 定方位法

定方位法は粘土鉱物の同定を行うことを目的として行われる。定方位法は、水ひ法により特定範囲粒径の粘土を採取して定方位のマウントを行った試料に対してエチレングリコール処理、ジアミン処理、塩酸処理、高温処理を行った試料と無処理の試料についてX線回折を行い、それぞれの結果を比較することで、含有される鉱物の種類とおおよその含有量を決定する方法である。

(4) 鉱物含有量の推定

結晶相の混合物からの X 線の強度は結晶相の含有量と相関関係があるので、結晶相同定後、適当な回折線を選んで結晶相の定量を行うことができる。しかし、回折 X 線の強度は、結晶相物質の含有量だけではなく鉱物の種類（化学組成・結晶構造）、結晶度、粉末粒子の形状、大きさ、方位、測定条件、および混合物全体の X 線吸収係数などの要素により決定される。その主要なもののみについてみても鉱物の種類によって異なり、同族の鉱物であっても変異があり、同じ結晶面の回折線強度が一定の強度を示すとは限らない。例えば、緑泥石のように大幅に化学組成が変わるために強度も大きく変わるものもある。このような試料では、定量しようとする鉱物の純粋状態での強度が必要であるのに、これを知る（あるいは基準試料を選ぶ）ことが困難である。また、完全な不定方位あるいは定方位試料をつくるのが難しいので、試料間の方向性の相違による誤差も避けられない。これらの限界により X 線回折による鉱物の定量は一般にかなり大きな誤差を含むことになり、厳密に定量的な評価を行うことは困難である。

今回の測定では、不定方位測定により得られた X 線回折デジタルデータを既知含有量の標準鉱物のそれと比較することによって経験的に各鉱物のおおよその含有量を推定した。

(5) 分析結果

X 線解析チャートを図 3.2-1 に示す。以下に各鉱物の同定結果を示す。

① シリカ鉱物の同定

シリカ鉱物であるオパール CT とオパール A は以下の定義に基づいて同定を行った。オパール CT は、クリストバライトとトリジマイトの混合物であり、回折線には 2θ (CuK α) = 21.66 で明確なピークが現れる。一方、オパール A は非晶質であるため、回折線には明確なピークが現れず、 2θ (CuK α) = 21.66 を中心に非常に幅広い弱い散乱（ブロードピーク）が現れる。

今回の分析では、オパール A のブロードピークが見られることから、幌延地域の珪藻質泥岩に特徴的なシリカ鉱物の変化：珪藻→オパール A→オパール CT→石英、の中で、オパール A のゾーンに区分されることが示される。また、これ以外に石英、斜長石、黄鉄鉱も確認された。

② スメクタイトの同定

スメクタイトの同定は無処理とエチレングリコール処理の結果を比較することにより行った。無処理定方位試料の回折実験により得られた CuK α : 2θ = 4.5~5.5° に分布する幅が広い回折線が、エチレングリコール処理後低角度 CuK α : 2θ = 4.5~5.1° に明らかに移動したことは、膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトの存在を示唆する。したがって、スメクタイトが、微量~少量程度存在すると推定される。

③ 緑泥石とカオリナイトの同定

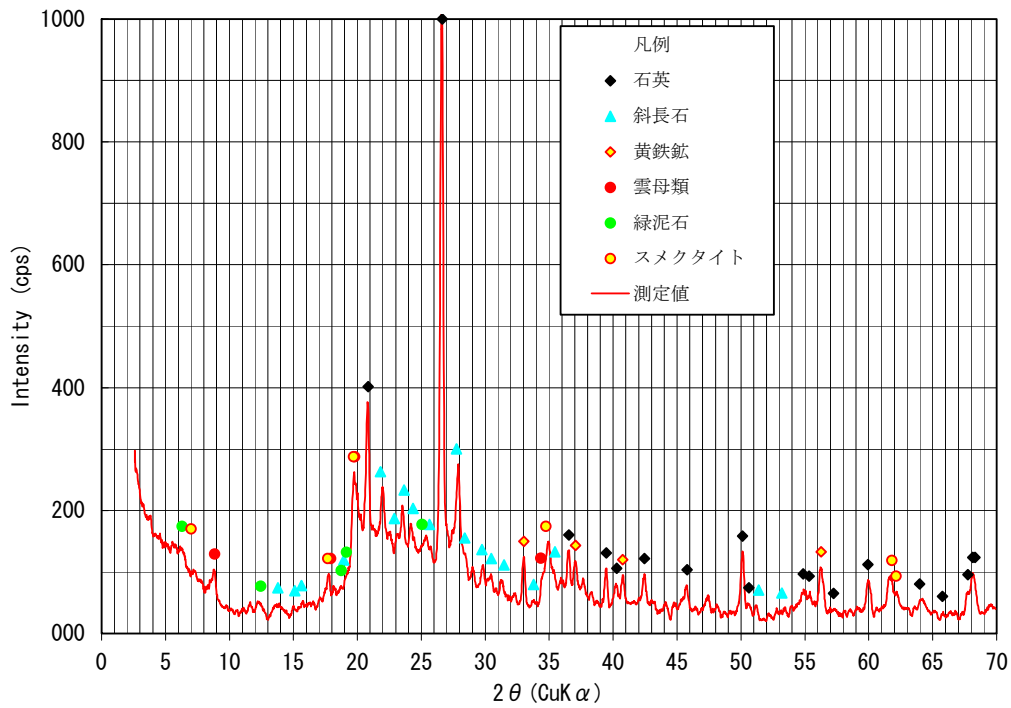
緑泥石とカオリン鉱物が共存する場合、緑泥石の 002, 004 の回折線とカオリン鉱物の 001, 002 の回折線が重なるため、カオリン鉱物と緑泥石の識別に困難が生じる。このような場合には、何らかの処理によってこれらの回折線の変化を観察し、同定を行う。ジアミン処理方法は、カオリナイトの底面間隔を膨張し、カオリナイトの 12.3° の回折線が 8.4° に広がる。したがって、

緑泥石の回折線と分離することによって、カオリナイトと緑泥石の識別が容易になる。分析試料に対してジアミン処理を行った結果、12. 3° 付近の回折線の移動が観察できなかったため、カオリンが存在していないことが確認された。

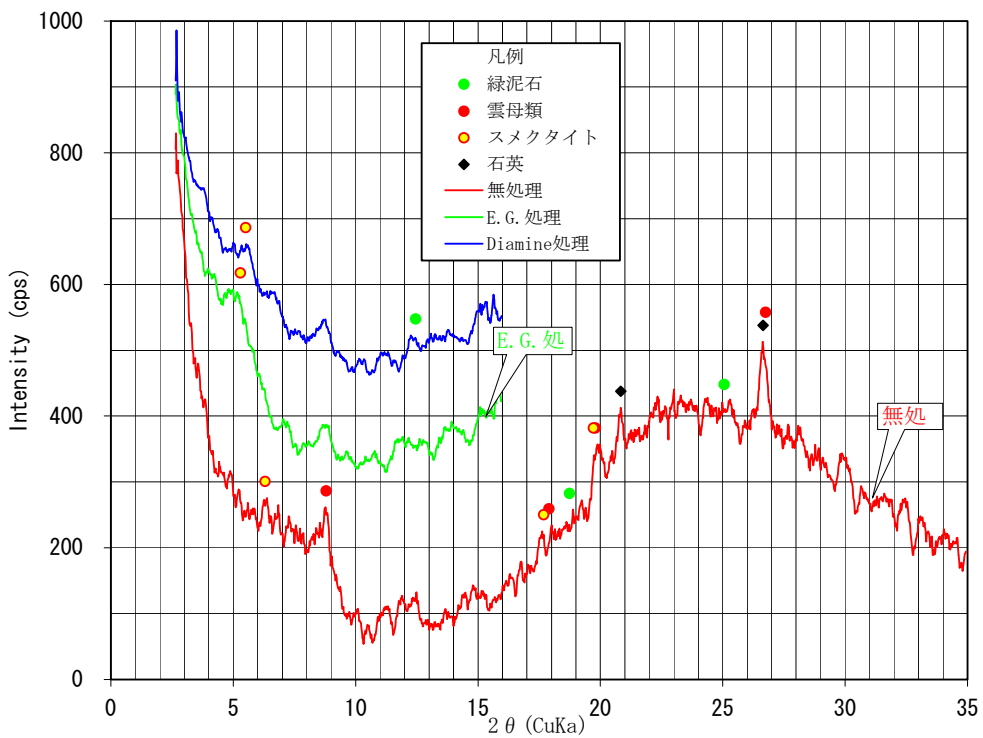
表 3.2-4 X線分析結果一覧

順番	試料名	シリカ鉱物				長石					沸石		粘土鉱物			備考	
		石英	非晶質? オパールA	オパールCT	トリジマイト	クリストバライト	カリ長石	斜長石			菱鉄鉱?	黄鉄鉱	石膏	濁沸石	斜ブチロル沸石		スメクタイト
1	H16-1-02	△	○				△		△				△	+	△		

凡例：● 多量，○ 中量，▲ 少量，△ 少量？ 微量，+ 微量，- 極微量，? 存在する可能性があります。



(a) 不定方位法



(b) 定方位法

図 3.2- 1 X 線分析結果 (H16-1-02)

3.2.4 空隙分布測定

試料の空隙分布を測定することを目的として、水銀圧入法による空隙の細孔径分布測定を行った。測定は、透水試験、トレーサー試験用試料を整形したごく近傍から岩片を採取して行った。

(1) 測定方法

水銀圧入法は、水銀が土壌や岩石表面に対して接触角大きく、濡れ性が小さいという性質を利用したもので、空隙率や乾燥嵩密度、真密度をはじめ、細孔径分布、細孔内比表面積などを求めることができる。

水銀圧入法による測定は、島津製作所製のポロシメーター（オートポア IV9520：測定細孔径 0.003～500 μm ）を用いて行った。試料は、大きさ 2.5～5.0mm 粒に破碎した試料を 105°C の温度で 1 時間乾燥させたものを用いた。

細孔径分布および細孔内比表面積の計算においては、水銀の土壌に対する一般的な物性値として、表面張力 $\gamma=0.480$ (N/m)、および接触角 $\theta=140^\circ$ を用いた。細孔径と水銀にかかる圧力、表面張力、接触角との関係は、Washburn の法則として関連付けられている。細孔径、細孔内比表面積、乾燥嵩密度、有効空隙率は、以下の関係から決定した。

$$D = - \left(\frac{4}{P_m} \right) \gamma \cdot \cos \theta \quad (3.2-1)$$

$$S_p = - \frac{1}{\gamma \cdot \cos \theta} \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} P_m dV \quad (3.2-2)$$

$$\rho_d = \frac{M_d}{V_c - \left(\frac{M_{me}}{\rho_{me}} \right)} \quad (3.2-3)$$

$$n_p = 100 V_{SP} \cdot \rho_d \quad (3.2-4)$$

ここに、D：細孔径 (m)、 P_m ：水銀にかけた圧力 (kg/m^2)、 γ ：水銀の試料表面での表面張力 (N/m)、 θ ：水銀の試料表面での接触角 ($^\circ$)、 S_p ：細孔内比表面積 (m^2/kg)、 V_{\max} ：水銀が最大孔径の空隙に注入された時のセル中の水銀体積 (m^3)、 V_{\min} ：水銀が最小孔径の空隙に注入された時のセル中の水銀体積 (m^3)、 ρ_d ：乾燥嵩密度 (kg/m^3)、 M_d ：乾燥状態での試料重量 (kg)、 V_c ：密閉セルの体積 (m^3)、 M_{me} ：水銀の重量 (kg)、 ρ_{me} ：水銀の密度 (kg/m^3)、 N_p ：有効空隙率 (%)、 V_{SP} ：比空隙体積 (単位重量当りの空隙体積) (m^3/kg) である。

図 3.2-2 に細孔半径と累積有効空隙率の関係を示す。また、図 3.2-3 に昨年度までに核燃料サイクル開発機構東海事業所にて実施された深部堆積岩試料（勇知層、声問層）の試験結果を同一グラフにプロットしたものを示す。これらの図より、今回の試料では、細孔半径 $0.2\mu\text{m}$ 付近以下から空隙の割合が増加しており、深部堆積岩試料では、声問層試料の結果と非常に類似していることが分かる。

表 3.2-5 に水銀圧入試験結果を示す。表より、基本物性試験結果よりも、水銀圧入試験結果の方が、約 20（%）程度低い有効空隙率が得られていることが分かる。これは、採取した試錐コアの状態が塊状部分と破碎部分が非常に不均質に入り混じっていたことから、この不均質性に起因していると考えられる。また、昨年度までに実施された深部堆積岩の試験結果にも見られるように、水銀圧入試験に用いた試料の岩石基質部の微細な空隙に水銀が侵入できなかったことも影響していると考えられる。測定に用いた水銀ポロシメータは、測定機器の性能上 $0.003(\mu\text{m})$ 以下の細孔径は測定することができない。そのため、測定結果としては、 $0.003(\mu\text{m})$ 以下の細孔径を切り捨てられたデータが得られている。しかし、実際は、より微細な空隙も存在すると考えられる。

表 3.2-5 水銀圧入試験結果一覧

孔名	深度 (m)	空隙率 (%)	累積細孔 体積 (mL/g)	累積細孔 比表面積 (m ² /g)	嵩密度 (g/cm ³)	真密度 (g/cm ³)	試料重量 (g)
H16-1-02	11.9	47.9	0.451	29.5	1.062	2.037	0.603

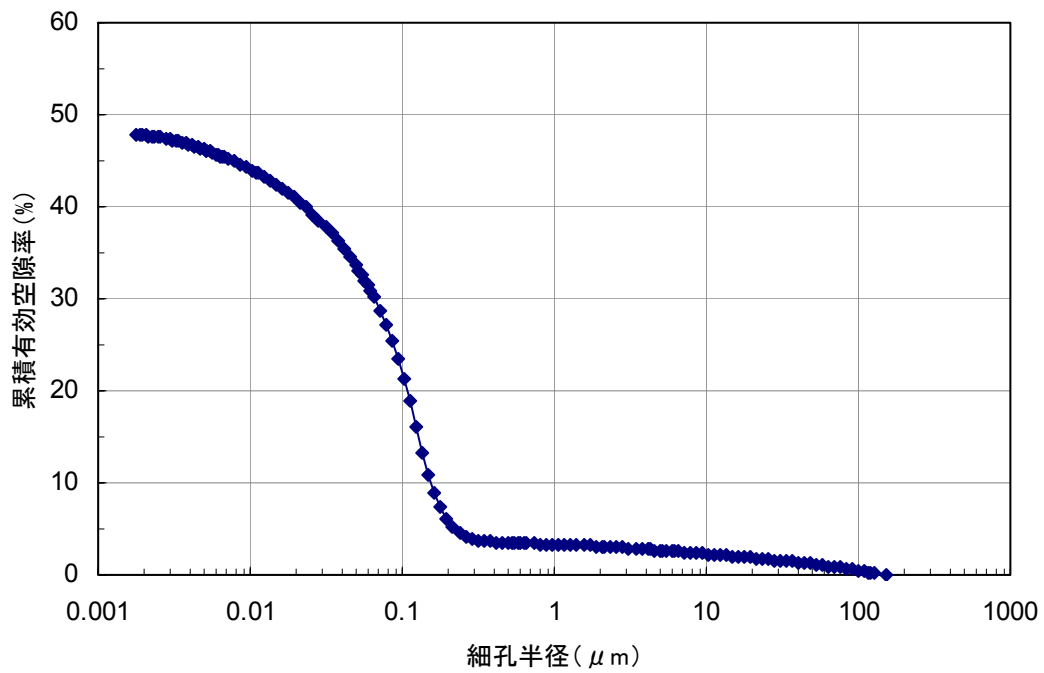


図 3.2-2 水銀圧入法による細孔径分布測定結果 (H16-1-02)

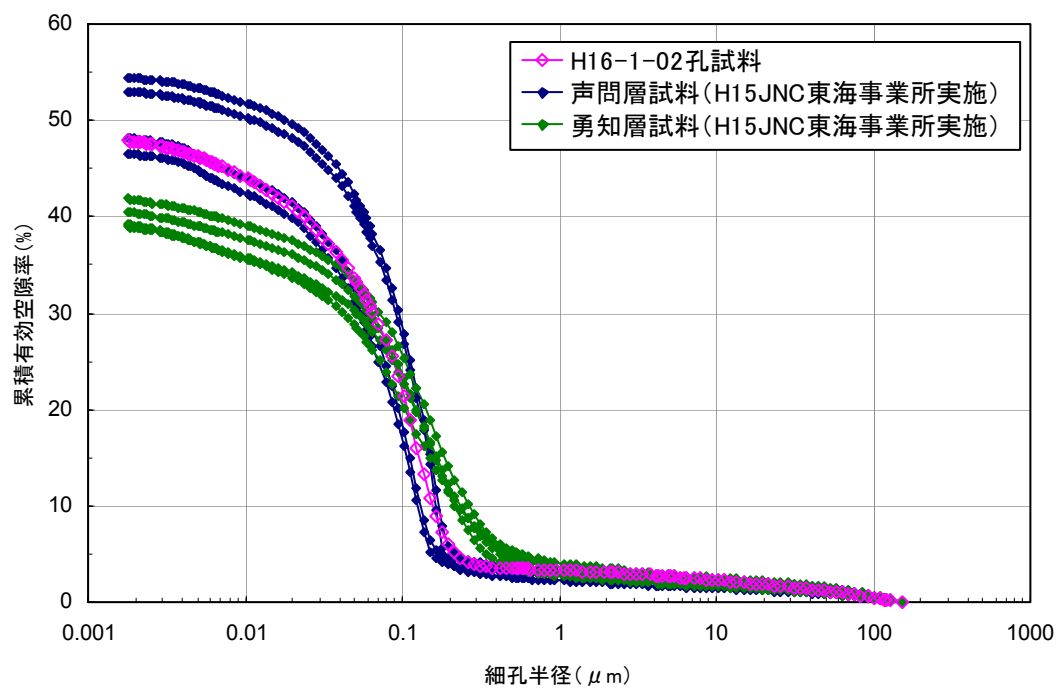


図 3.2-3 水銀圧入法による細孔径分布測定結果 (深部堆積岩との比較)

3.3 コア試料を対象とした透水試験

(1) 試験方法

試験に用いたトランジェントパルス透水試験装置の概要、概観及び、測定原理をそれぞれ、図 3.3-1、図 3.3-2、写真 3.3-1 に示す。本装置の特徴は、温度変化による水圧への影響を低減するため、装置全体を水槽内に沈める機構を有することである。試験手順を図 3.3-3 に示し、試験手順の詳細を以下に述べる。

① 試料セット

三軸セルに試料をセットし、装置内、配管内のエア抜きを行う。

② 封圧の載荷

試料に側圧、軸圧を載荷する。試料採取深度に相応の側圧、軸圧を載荷し、圧力が安定するまで監視する。

③ 間隙水圧の載荷

試料及び上下貯留槽内に一樣な水圧を加え、水圧が一定になるまで監視する。

④ 水圧パルスを作用

上流側貯留槽内の水圧をパルス幅 H だけ上昇させ、水圧の安定を確認した後、バルブの開閉により試料に水圧パルスを作用させる。

⑤ 水圧変化の測定、記録

上下流の水圧の経時変化を測定、記録する。

⑥ 水圧平衡

水圧が平衡に達した時点で、計測を終了する。

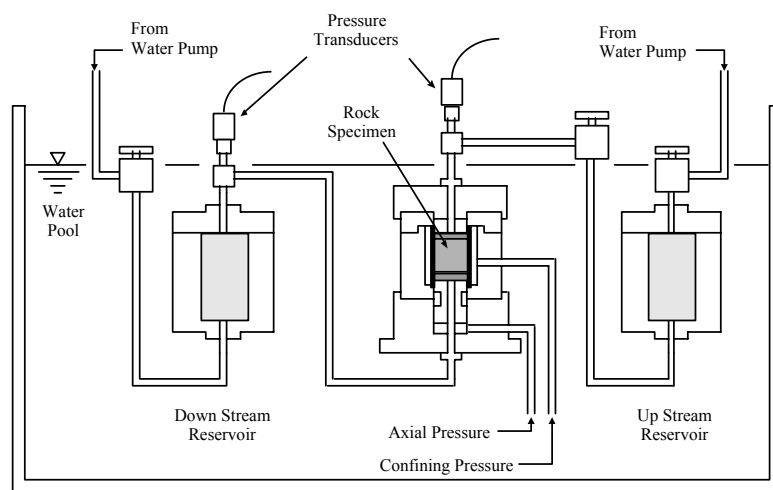


図 3.3- 1 トランジェントパルス透水試験装置概要



写真 3.3- 1 トランジェントパルス透水試験装置概観

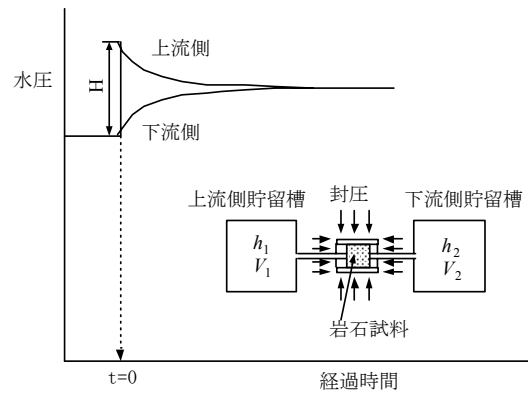


図 3.3-2 トランジェントパルス法測定原理

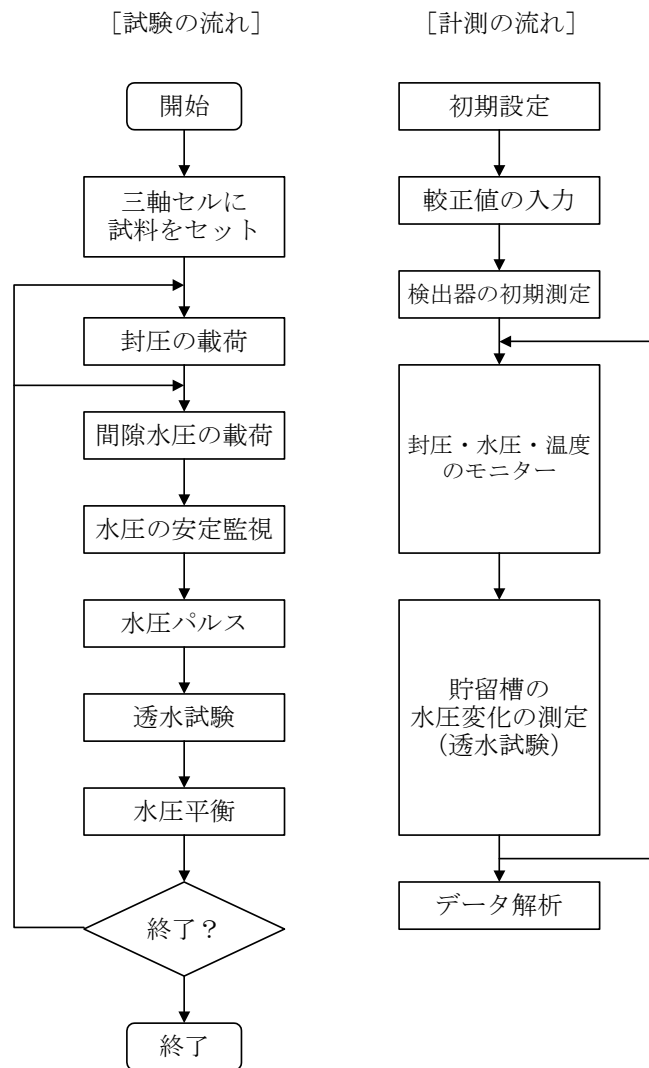


図 3.3-3 トランジェントパルス透水試験手順

(2) 試験ケース

トランジェントパルス透水試験法の試験ケースを表 3.3-1 に示す。封圧については、本来は試料の埋没深度相当に設定することが望ましいが、本試験装置の構造上、少なくとも 0.3(MPa)以上の封圧を載荷する必要があるため、今回の試験では、全てのケースについて装置の最低封圧である 0.3(MPa)に設定した。

温度 : 室温
封圧 : 0.3 (MPa/m)
間隙水圧 : 0.1 (MPa/m)

表 3.3- 1 トランジェントパルス透水試験ケース

採取孔名	深度	封圧(MPa)	間隙水圧(MPa)	有効応力(MPa)
H16-1-02	10m付近	0.3	0.1	0.2
H16-1-07	30m付近	0.3	0.1	0.2
H16-1-15	10m付近	0.3	0.1	0.2

(3) 試験結果

トランジェントパルス透水試験の結果を、図 3.3-5～図 3.3-7 ならびに表 3.3-3 に示した。トランジェントパルス透水試験の解析には、Brace 法と、差圧を用いた Hsieh 法を用いた。それらの方法を以下に述べる。

(a) Brace 法 (Brace, W.F.他、1968)

Brace 法では、上下流水槽内の水圧差の測定結果を次式にフィットさせることにより、透水係数を求める方法である (Brace, W.F.他、1968)。

$$\frac{h_u - h_d}{H} = \exp\left[-\frac{V_u + V_d}{V_u V_d} \frac{KAt}{\ell C_w \gamma_w g}\right] \quad (3.3-1)$$

ここに、 H : パルス圧幅 (MPa)、 h_u : 上流側水圧 (MPa)、 h_d : 下流側水圧 (MPa)、 V_u : 上流側貯留槽の容積 (m^3)、 V_d : 下流側貯留槽の容積 (m^3)、 K : 岩石試料の透水係数 (m/s)、 A : 岩石試料の断面積 (m^2)、 t : 経過時間 (s)、 ℓ : 岩石試料の長さ (m)、 C_w : 水の圧縮率 (m^2/kN)、 γ_w : 水の密度 (kg/m^3)、 g : 重力加速度 (m/s^2)

Brace 法は、上下流水槽内の水圧差を用いるため、温度影響による水圧変化分がキャンセルアウトされる利点を有する。しかし、岩石内貯留が上下流水槽の貯留量に比べて無視しうるといふ仮定に基づいており、比貯留係数を算出することはできない。

(b) 差圧を用いた Hsieh 法 (Hsieh, P.A.他、1981)

岩石内貯留を考慮した水圧変化の厳密解として、次式で示される Hsieh の解がある (Hsieh, P.A.他、1981)。

$$\frac{h_u}{H} = \frac{1}{1 + \beta + \gamma} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha \phi_m^2) (\beta + \gamma \phi_m^2 / \beta)}{[\gamma^2 \phi_m^4 / \beta^2 + (\gamma^2 \beta + \gamma^2 + \gamma + \beta) \phi_m^2 / \beta + (\beta^2 + \gamma \beta + \beta)]} \quad \dots (3.3-2)$$

$$\frac{h_d}{H} = \frac{1}{1 + \beta + \gamma} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha \phi_m^2) (\beta - \gamma \phi_m^2 / \beta)}{[\gamma^2 \phi_m^4 / \beta^2 + (\gamma^2 \beta + \gamma^2 + \gamma + \beta) \phi_m^2 / \beta + (\beta^2 + \gamma \beta + \beta)] \cos \phi_m} \quad \dots (3.3-3)$$

ここで、 ϕ_m は次式の根である。

$$\tan \phi = \frac{(1 + \gamma) \phi}{\gamma \phi^2 / \beta - \beta} \quad \dots (3.3-4)$$

上式中の α 、 β 、 γ は無次元数で、以下のように表される。

$$\alpha = \frac{Kt}{\ell^2 S_s}, \quad \beta = \frac{S_s A \ell}{S_u}, \quad \gamma = \frac{S_d}{S_u} \quad \dots (3.3-5)$$

$$S_u = C_w \gamma_w V_u g \quad \dots (3.3-6)$$

$$S_d = C_w \gamma_w V_d g \quad \dots (3.3-7)$$

ここに、 H : パルス圧幅 (MPa)、 h_u : 上流側水圧 (MPa)、 h_d : 下流側水圧 (MPa)、 S_u : 上流側貯留槽の貯留量 (m^2)、 S_d : 下流側貯留槽の貯留量(m^2)、 K : 岩石試料の透水係数 (m/s)、 A : 岩石試料の断面積(m^2)、 t : 経過時間 (s)、 l : 岩石試料の長さ (m)、 C_w : 水の圧縮率 (m^2/kN)、 γ_w : 水の密度 (kg/m^3)、 g : 重力加速度 (m/s^2)、である。

Hsieh の解では、上・下流側の水圧を個々にフィットするため、温度による水圧変化の影響によって解析誤差が生じやすい。そこで、(3.3-2)式と(3.3-3)式の差を取ることで、温度による水圧変化分をキャンセルアウトする方法が考えられる。この方法を、ここでは「差圧を用いた Hsieh 法」と呼ぶこととする。

Brace 法と差圧を用いた Hsieh 法による解析結果を図 3.3-5～図 3.3-7 のグラフ中に示した。いずれも理論解との良好な一致が見られる。

図 3.3-4 に Hsieh 法による解析手順の概念図を示し、以下に具体的な解析手順を示す。

- ① 測定された上下流側貯留槽の水圧変化を理論曲線とマッチングし、そのときの β ($=\beta^*$) と、 $\alpha\beta^2=1$ のときの t ($=t^*$) を求める。
- ② ①で求めた β および t を用いて (3.3-5) 式より、比貯留係数 S_s を求める。
- ③ ②で求めた S_s と①で求めた t を用いて (3.3-5) 式より、 K を求める。

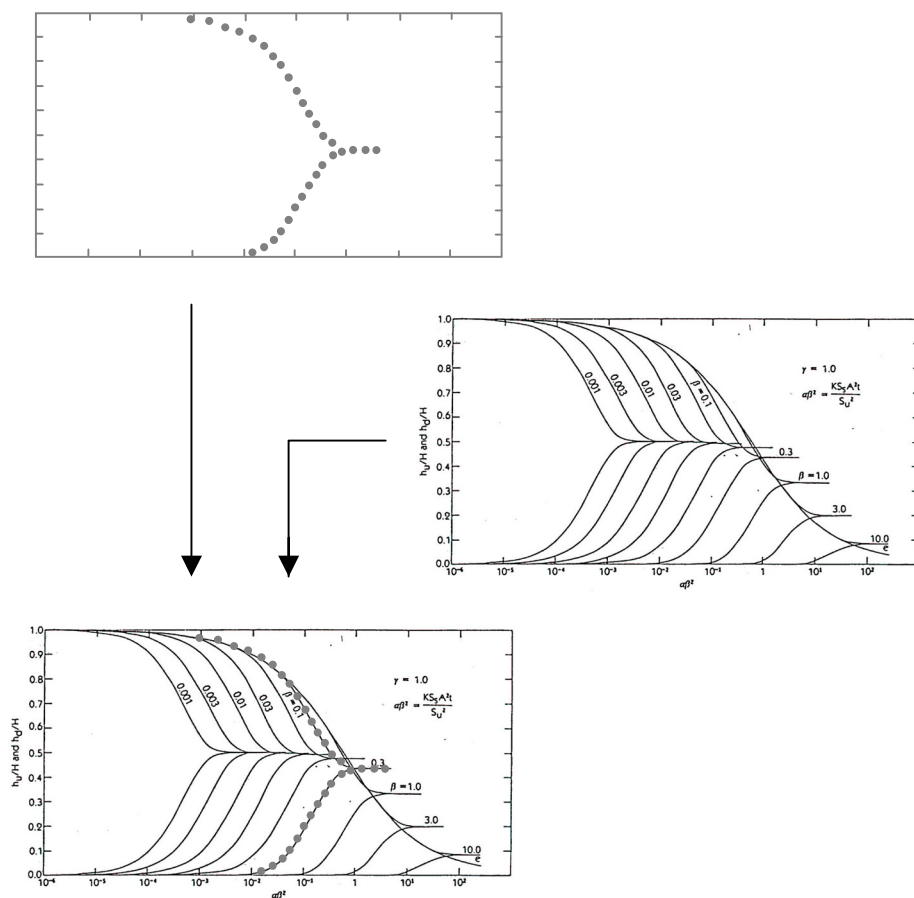


図 3.3-4 Hsieh 法による解析手順の概念図

試験結果から、今回の表層部試料の透水係数は、 8.0×10^{-10} (m/s) ～ 2.0×10^{-9} (m/s) 程度であった。また、表 3.3-4、図 3.3-8 に示した深部堆積岩試料の試験結果と比較すると、勇知層、声間層の透水性よりもやや大きい値が得られていることが分かった。さらに、図 3.3-9 に有効空隙率と透水係数の関係について深部堆積岩試料の結果と併せてプロットしたものを示す。図より、勇知層を除いた全ての試料については、有効空隙率との間に正の相関が見られることが分かった。

表 3.3-2 トランジェントパルス透水試験法で用いた既知パラメータ一覧

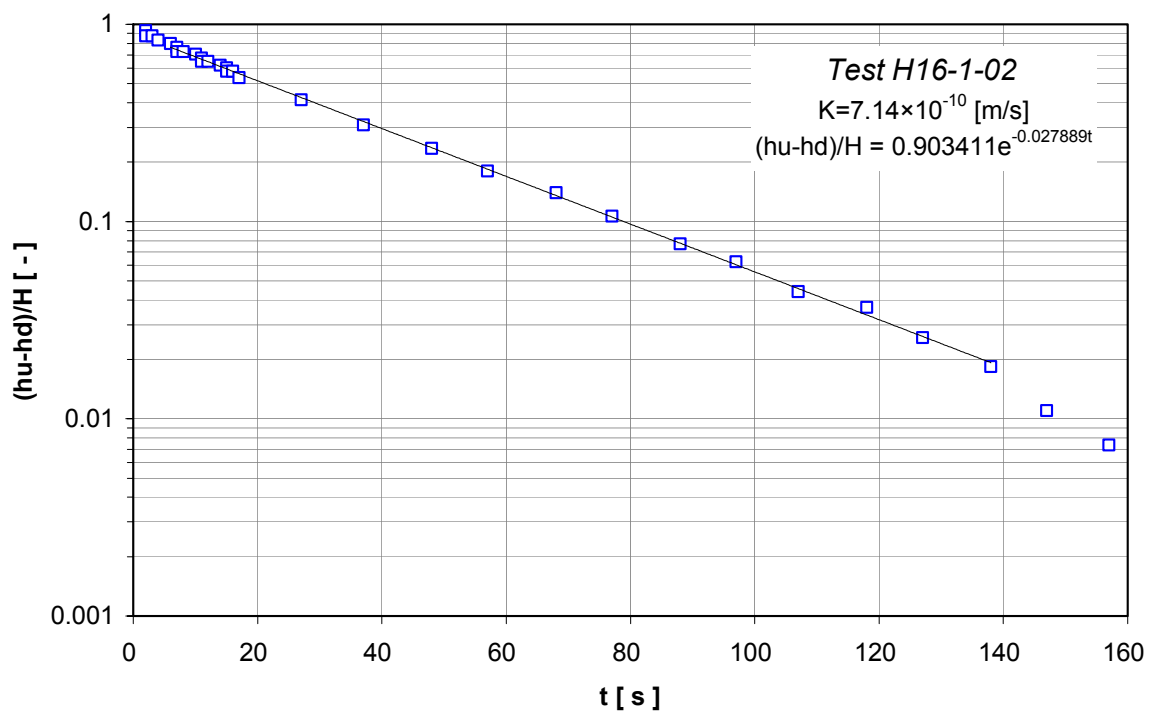
	単位	既知パラメータ値
V_u	(m^3)	4.15E-04
V_d	(m^3)	4.15E-04
A	(m^2)	1.96E-03
l	(m)	5.00E-02
C_w	(m^2/kN)	4.65E-07
γ_w	(kN/m^3)	9.7890

表 3.3-3 トランジェントパルス透水試験結果一覧

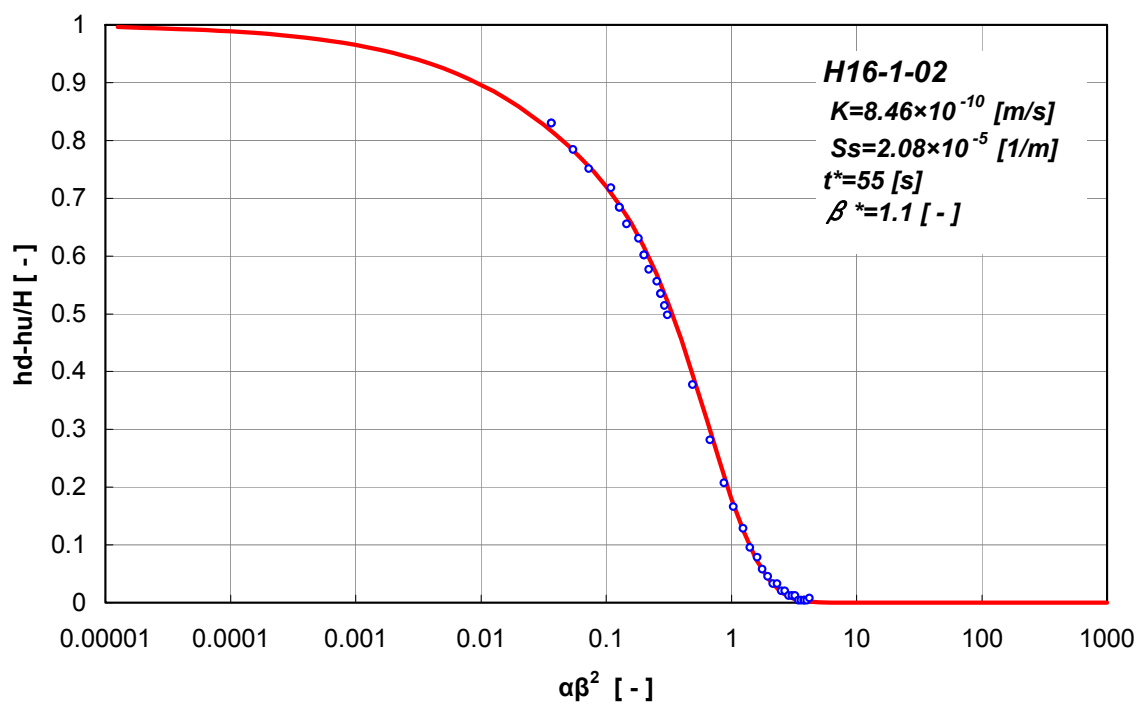
採取孔名	地層名	試料名	採取深度 (m)			封圧 [MPa]		間隙水圧 [MPa]	パルス圧 [MPa]	透水係数 (m/s)		比貯留係数 (l/m)
						軸圧	側圧			brace法	差圧を用いたhsieh法	
H-16-01-02	表層	H-16-01-02	11.40	～	13.00	0.30	0.30	0.10	0.05	7.14E-10	8.46E-10	2.08E-05
H-16-01-03	表層	H-16-01-07	27.80	～	29.00	0.30	0.30	0.10	0.05	4.82E-10	8.47E-10	1.08E-04
H-16-01-04	表層	H-16-01-15	11.50	～	13.00	0.30	0.30	0.10	0.05	1.37E-09	2.12E-09	1.67E-05

表 3.3-4 深部堆積岩の透水試験結果 (H14、H15：核燃料サイクル開発機構東海事業所)

採取孔名	地層名	試料名	採取深度 (m)			封圧 [MPa]		間隙水圧 [MPa]	パルス圧 [MPa]	透水係数 (m/s)		比貯留係数 (l/m)
						軸圧	側圧			brace法	差圧を用いたhsieh法	
HDB-7孔	勇知層	7-1i-001	189.65	～	190.00	3.60	3.60	2.00	0.10	2.11E-10	2.54E-10	1.29E-05
		7-1i-90								2.78E-10	2.86E-10	1.10E-05
		7-2i	226.85	～	228.27	4.10	4.10	2.30	0.10	3.31E-10	4.09E-10	1.01E-05
HDB-6孔	声間層	7-3i	240.00	～	240.60	4.30	4.30	2.40	0.10	1.98E-10	2.22E-10	1.08E-05
		6-2i-h	202.00	～	202.60	3.60	3.60	2.00	0.10	5.40E-10	7.53E-10	8.74E-06
		6-2i-v								4.21E-10	4.53E-10	1.11E-05
		6-4i-h	245.10	～	245.60	4.50	4.50	2.50	0.10	1.71E-10	1.93E-10	4.08E-06
6-4i-v	1.13E-10	1.27E-10								1.18E-05		
HDB-4孔	稚内層	2-1i	195.00	～	195.70	3.6	3.6	2.00	0.10	4.83E-12	5.49E-12	1.12E-05
		3-2i	314.00	～	314.40	5.4	5.4	3.00	0.10	4.83E-12	4.88E-12	6.08E-06
		4-1i	441.50	～	442.00	8.1	8.1	4.50	0.10	1.69E-12	1.63E-12	8.11E-06

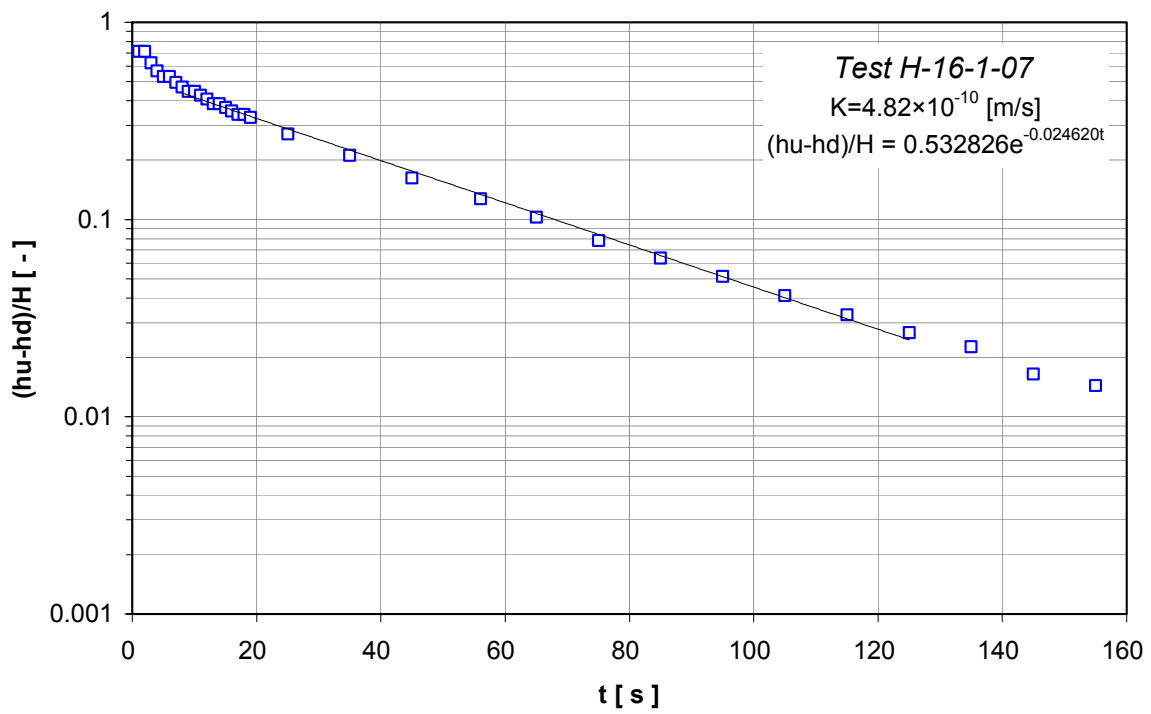


(a) Brace 法

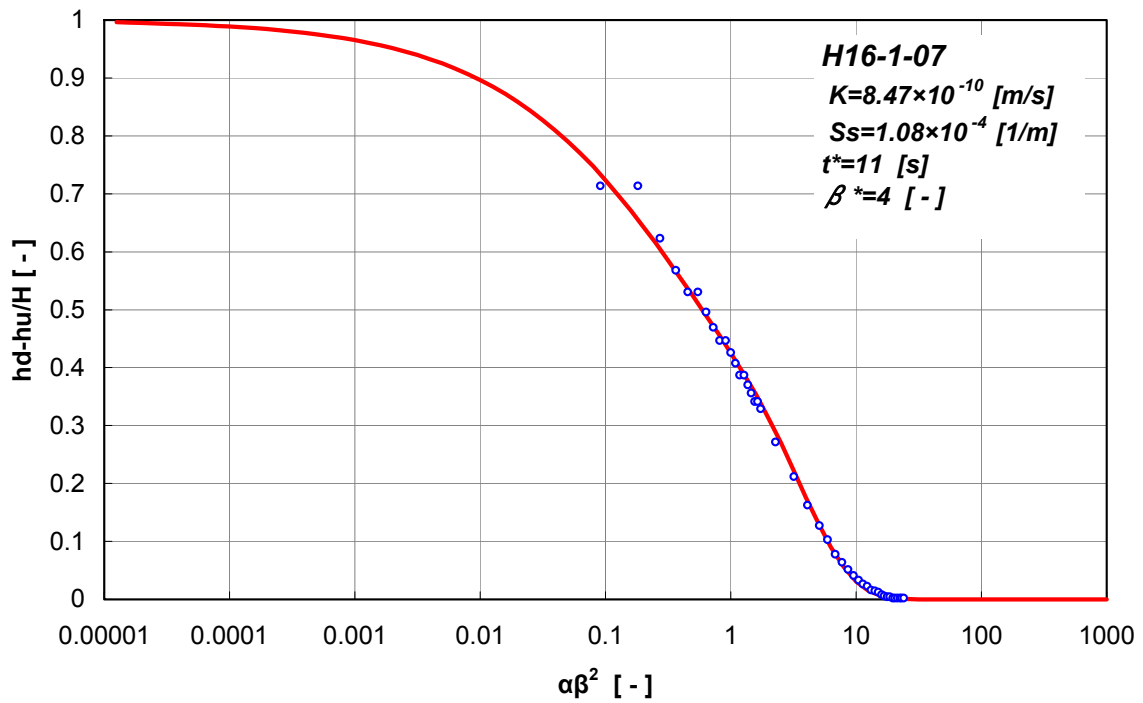


(b) 差圧を用いた Hsieh 法

図 3.3- 5 トランジェントパルス透水試験結果 (H16-1-02)

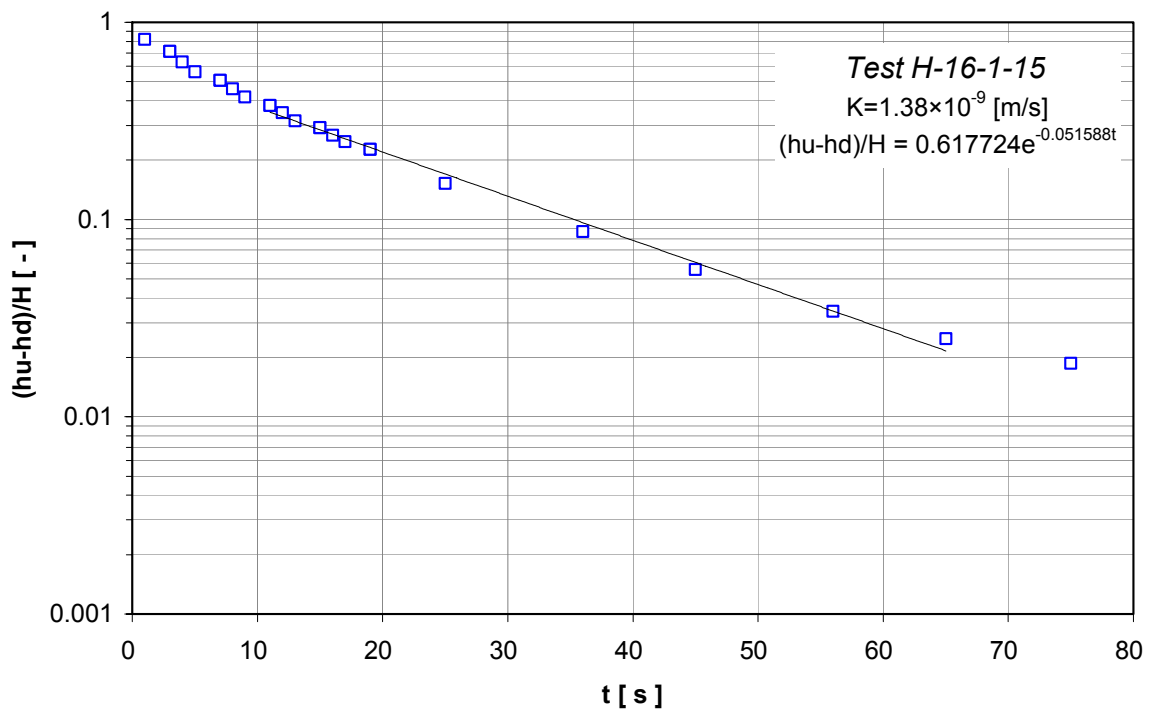


(a) Brace 法

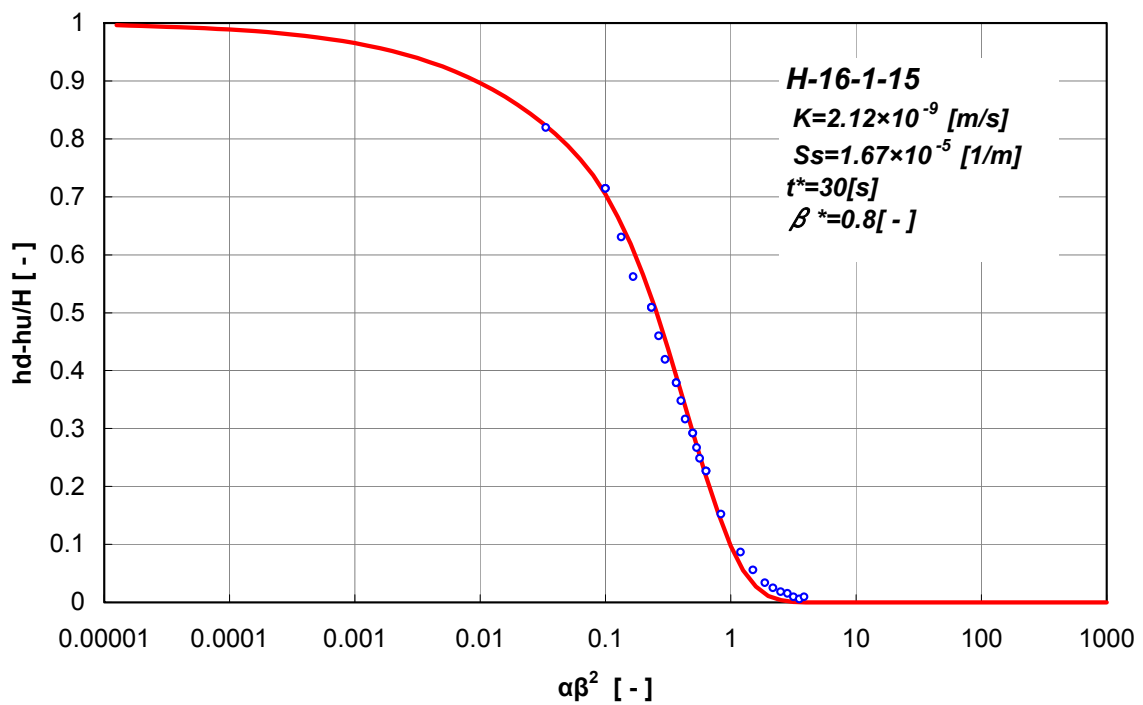


(b) 差圧を用いた Hsieh 法

図 3.3-6 トランジェントパルス透水試験結果 (H16-1-07)



(a) Brace 法



(b) 差圧を用いた Hsieh 法

図 3.3-7 トランジェントパルス透水試験結果 (H16-1-15)

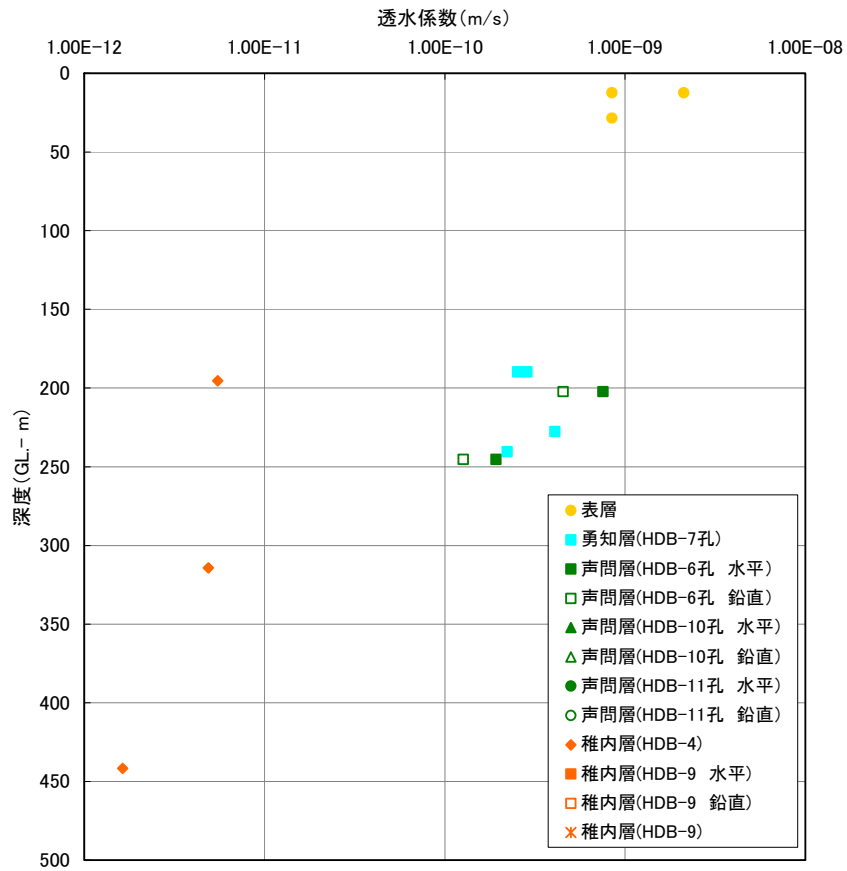


図 3.3-8 透水試験結果（深部堆積岩試料との比較）

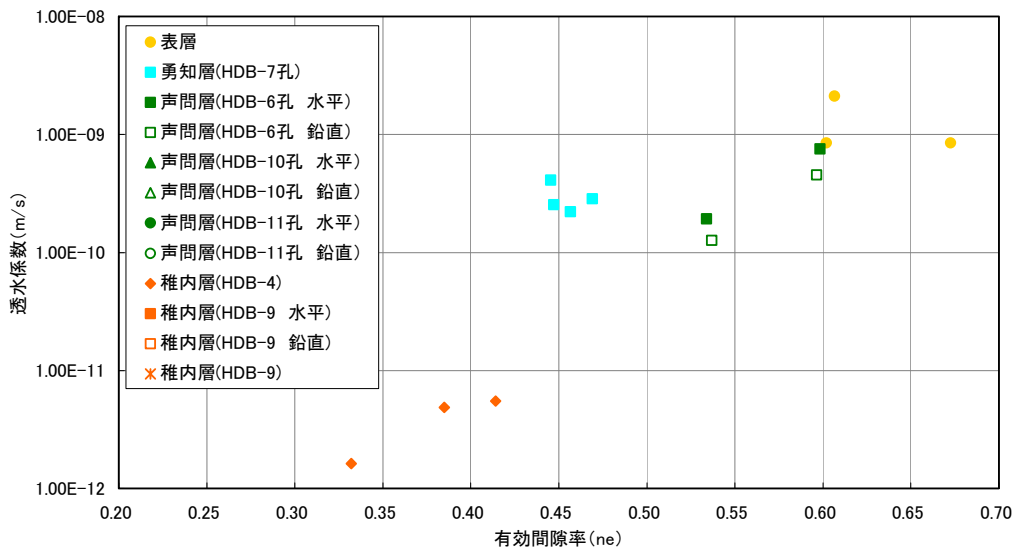


図 3.3-9 有効空隙率と透水係数との関係（深部堆積岩との比較）

3.4 コア試料を対象としたトレーサー試験

コア試料のトレーサー試験は、透過拡散法による拡散試験を実施した。以下に試験方法と結果について説明する。

3.4.1 拡散試験

(1) 試験方法

試験装置の概要を図 3.4-1、図 3.4-2 に示す。本試験は、透過拡散法による拡散実験である。透過拡散法とは、岩石試料で仕切られた 2 つのセルにそれぞれトレーサー溶液と水を入れ、2 つのセル内のトレーサー濃度の経時変化から岩石の拡散係数を求める方法である。

以下に、試験手順に沿って、試験方法を述べる。

① 供試体作成

供試体は、図 3.4-2 に示すように、採取試料を直径 30mm、厚さ 5mm の円盤状に整形し、周囲をエポキシ系樹脂により固めたものである。なお、供試体の作成中は試料をなるべく乾燥させないよう注意を払い、供試体作成後は速やかに試料脱気を行った。

② 試体のセット

作成した供試体は、図 3.4-1、図 3.4-2 に示すアクリル製の拡散セルに、2 つのセルで挟み込むようにセットした。

③ 供試体の脱気

供試体セット後、両セルに脱イオン水を入れ真空槽にて脱気を行った。

④ 拡散実験の開始

供試体の脱気を完了後、トレーサーセル側の脱イオン水をトレーサー溶液（ヨウ化カリウム水溶液）と交換し、拡散実験を開始した。この時、動水勾配による溶液の移流が発生しないよう、トレーサー溶液および脱イオン水の容量はともに 50ml とし、両セルの水位を同じにした。

⑤ 測定セル側溶液のサンプリングおよび脱イオン水の補充

試験開始の 1 時間後から、1 時間おきに測定セルから 20ml ずつサンプリングし、サンプリング後は同量の脱イオン水を測定セルに補充した。測定セルの脱イオン水の補充により生じる希釈の影響は、サンプリング毎の量とその濃度から補正を行った。なお、サンプリング間隔は、時間-濃度のプロットの立ち上がり時間を確認し、直線形状を確認した時点から間隔を長く取っている。

⑥ サンプルの分析

サンプリングした溶液中に含まれるヨウ化物イオン濃度を ICP 発光分光分析(定量下限値:0.01 mg/L)により求めた。

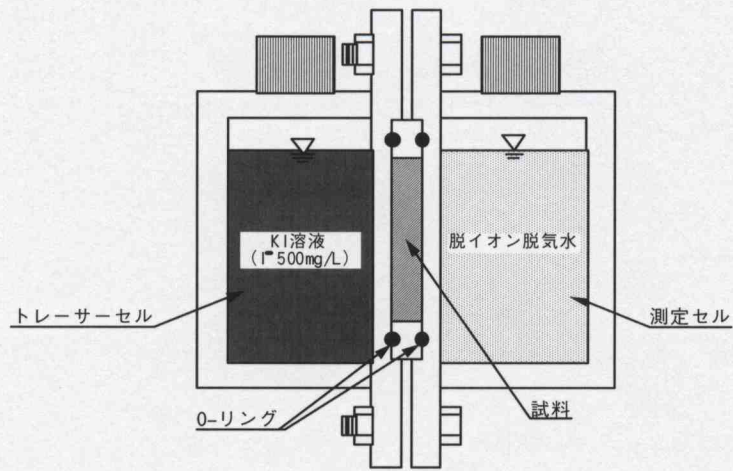


図 3.4-1 拡散実験装置概要

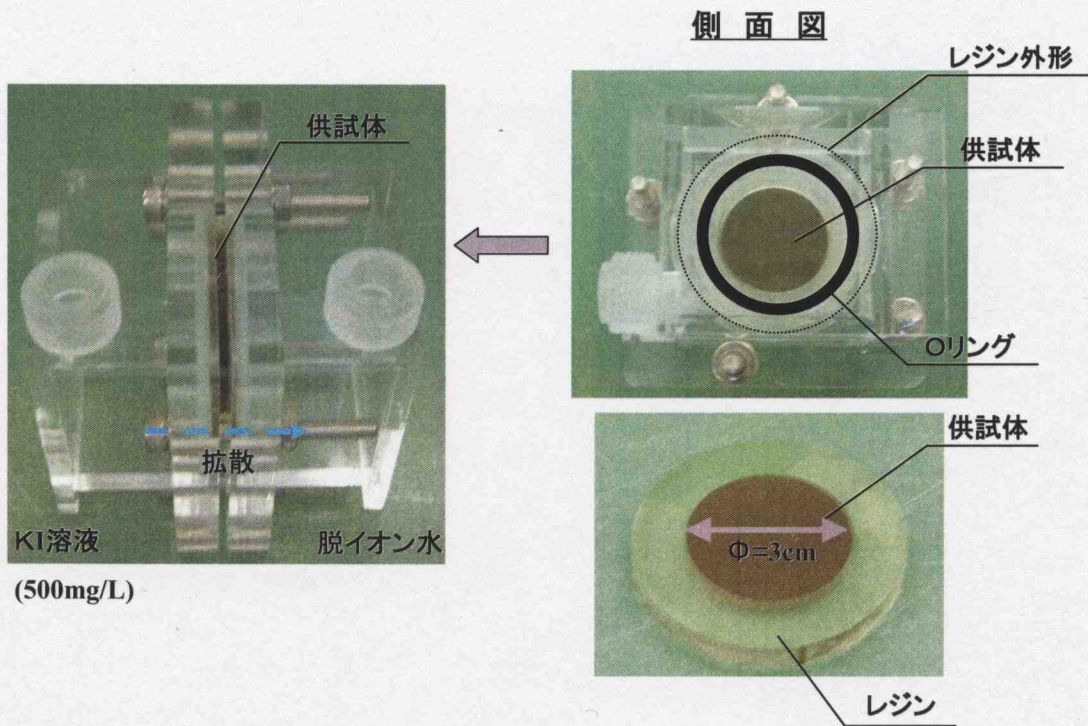


図 3.4-2 拡散実験装置および供試体の概観

(2) 試験ケース

試験ケースを表 3.4-1 に示す。試験は、透水試験と同様に、試料採取を行った 3 孔全てについて実施した。試験条件は、全試験ケースとも同様とした。

トレーサー溶液にはヨウ化カリウム (KI) 水溶液を用い、トレーサー濃度は、ヨウ化物イオン (I⁻) 濃度を対象に測定した。また、溶液濃度は、ヨウ化物イオンの酸化による測定結果への影響を考慮して、低濃度の I⁻ 500 (mg/L) とした。表 3.4-2 に試験条件の一覧を示す。

表 3.4-1 拡散試験ケース

採取孔名	深度
H16-1-02	10m付近
H16-1-07	30m付近
H16-1-15	10m付近

表 3.4-2 試験条件一覧

項目	実験条件
トレーサーセル側	ヨウ化カリウム水溶液
	・濃度 : I ⁻ 500 (mg/L)
	・容量 : 50 (ml)
測定セル側	脱イオン水
	・容量 : 50 (ml)
温度	室温 (22°C ~ 25°C)

(3) 試験結果

試験結果を図 3.4-3～図 3.4-5 に示す。拡散試験では、得られた試験結果を用い、以下に述べる方法で拡散係数を求める。

①解析方法

一次元の拡散方程式を、初期条件 $C_p(t,x)=0$ 、 $t=0$ 、 $0 \leq x \leq H$ 、境界条件 $C_p(t,x)=C_0$ 、 $t>0$ 、 $x=0$ 、 $C_p(t,x)=0$ 、 $t>0$ 、 $x=H$ のもとで解くことにより、次式を得る。

$$Cd = \frac{Sr \cdot H \cdot C_0}{Vm} \left[\frac{De \cdot t}{H^2} - \frac{\alpha}{6} - \frac{2\alpha}{\pi^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^n}{n^2} \cdot \exp\left(-\frac{De \cdot n^2 \cdot \pi^2 \cdot t}{H^2 \cdot \alpha}\right) \right\} \right] \quad (3.4-1)$$

ここに、 C_p ：間隙水中のトレーサー濃度、 t ：時間、 x ：拡散源からの距離、 H ：試料の厚さ (m)、 C_0 ：トレーサーセル中のトレーサー濃度 (mg/L)、 Cd ：測定セル中のトレーサー濃度 (mg/L)、 Sr ：試料の断面積 (m²)、 De ：実効拡散係数 (m²/s)、 Vm ：測定セル中の溶液体積 (m³) である。また、 α は収着容量であり、 $\alpha = n + \rho \cdot Kd$ (n ：試料の有効空隙率、 ρ ：試料の乾燥密度 (kg/m³)、 Kd ：分配係数 (m³/kg)) で与えられる。

ここで、上式(3.4-1)の指数項部は、試験時間のあまり経過していない初期の非定常状態における Cd の経時変化を表しており、ある程度の時間が経過した後は、これを無視できる。従って、上式 (3.4-1) は、近似的に次式 (3.3-2) のように表せる。

$$Cd = \frac{Sr \cdot H \cdot C_0}{Vm} \left(\frac{De \cdot t}{H^2} - \frac{\alpha}{6} \right) \quad (3.4-2)$$

つまり、実効拡散係数は、時間に対する濃度増加の傾きから、(3.4-2) 式から求められる。さらに、見かけの拡散係数を次式に与えられるタイムラグ法によって求めた。

$$Da = \frac{H^2}{6T_{int}} = \frac{De}{\alpha} \quad (3.4-3)$$

ここに、 Da ：見かけの拡散係数 (m²/s)、 T_{int} ：(3.4-2) 式を時間軸まで外挿した時の時間 (s) である。

②解析結果

解析により求めた実効拡散係数、見かけの拡散係数および収着容量を表 3.4-3 に示す。また、昨年度までに核燃料サイクル開発機構東海事業所が実施した解析結果を表 3.4-4 に示す。実効拡散係数については、 $1.5 \times 10^{-10} \sim 3.5 \times 10^{-10}$ (m²/s) であり、勇知層、声間層の値とほぼ同等の値であった。

また、既往の新第三紀泥岩、凝灰岩の拡散係数 (核燃料サイクル開発機構、2000) ならびに昨年度までに実施された深部堆積岩の拡散試験結果と今回の試験結果の比較を図 3.4-6 に示す。なお同図は、有効空隙率と有効拡散係数の関係についてプロットしたものである。同図より、既往の試験結果と比べて、今回の結果は同一の有効空隙率を有する試料の中ではやや大きい値を示して

いるが、同一のトレンドを示すことが分かる。

また、収着容量から求めた分配係数を求めると、0に近い値となることから、当試料へのヨウ化物イオンの収着量は非常に小さいものと考えられる。

表 3.4-3 拡散試験結果一覧

	実効拡散係数 De (m ² /sec)	見かけの拡散係数 Da(m ² /sec)	収着容量 α	分配係数 m ³ /kg	有効間隙率 ne
H16-1-02	1.74E-10	2.57E-10	0.677	0.0001	0.602
H16-1-07	3.58E-10	4.29E-10	0.835	0.0002	0.673
H16-1-15	1.50E-10	2.87E-10	0.522	-0.0001	0.607

表 3.4-4 拡散試験結果一覧 (H14、H15：核燃料サイクル開発機構東海事業所)

地層名	試料名	実効拡散係数 De (m ² /sec)	見かけの拡散係数 Da(m ² /sec)	収着容量 α	分配係数 m ³ /kg	有効間隙率 ne
勇知層	7-1i-003	1.44E-10	5.52E-10	0.261	-0.0001	0.447
	7-1i-902	9.50E-11	9.41E-09	0.010	-0.0003	0.469
	7-2i-2	1.17E-10	1.02E-09	0.115	-0.0002	0.440
	7-3i	2.32E-10	1.70E-08	0.014	-0.0003	0.457
声問層	6-2i-h	6.78E-10	6.01E-10	1.128	0.0005	0.598
	6-2i-v	3.30E-10	1.58E-09	0.209	-0.0004	0.596
	6-4i-h	2.59E-10	1.56E-09	0.166	-0.0003	0.534
	6-4i-v	2.08E-10	1.29E-09	0.161	-0.0003	0.537
稚内層	2-2i	2.34E-11	6.86E-11	0.342	-0.049	0.414
	3-4i	2.55E-11	3.36E-11	0.758	0.244	0.384
	4-2i	8.16E-12	3.84E-11	0.212	-0.072	0.332

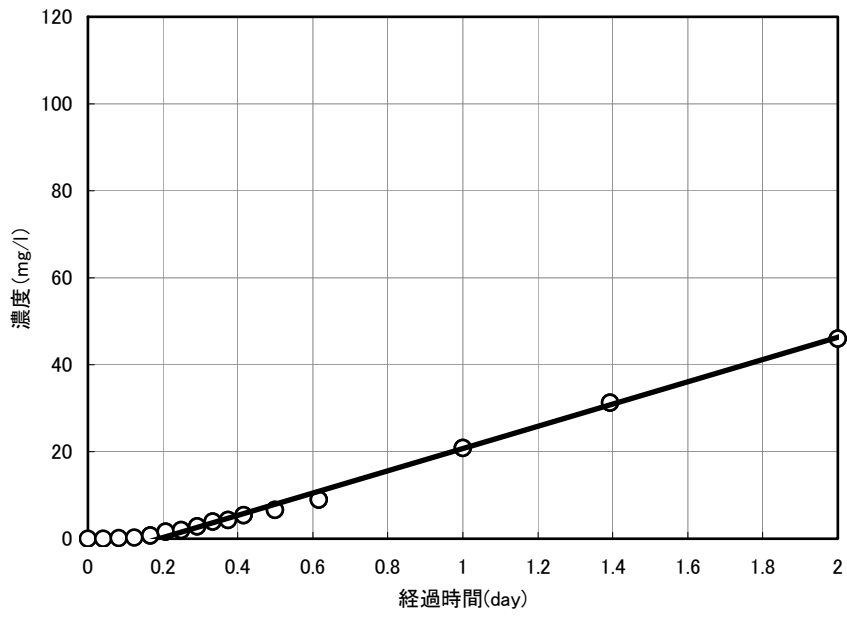


图 3.4- 3 扩散试验结果 (H16-1-02)

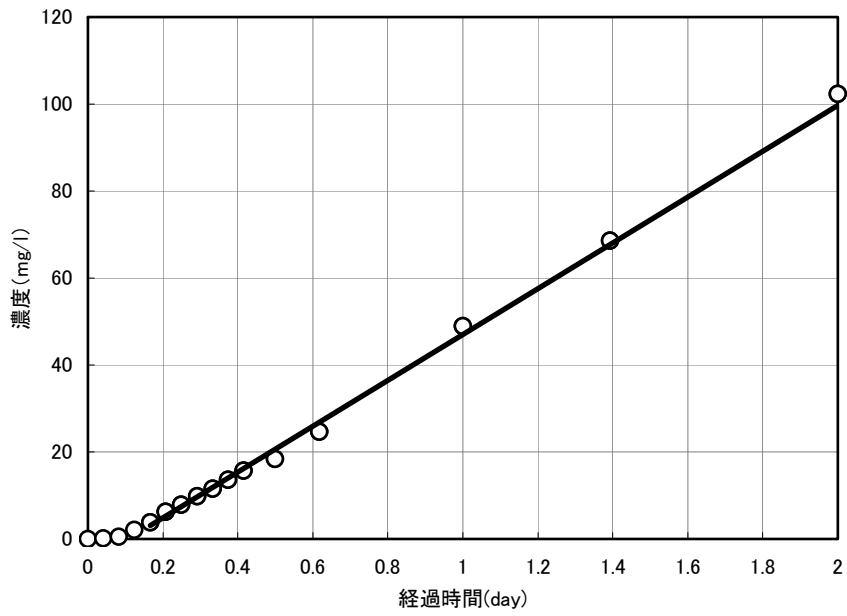


图 3.4- 4 扩散试验结果 (H16-1-07)

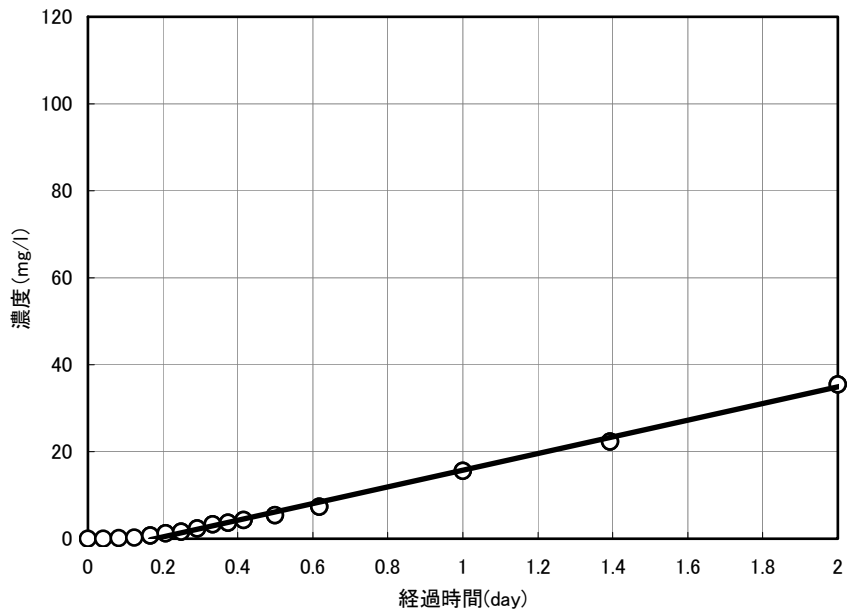


図 3.4- 5 拡散試験結果 (H16-1-15)

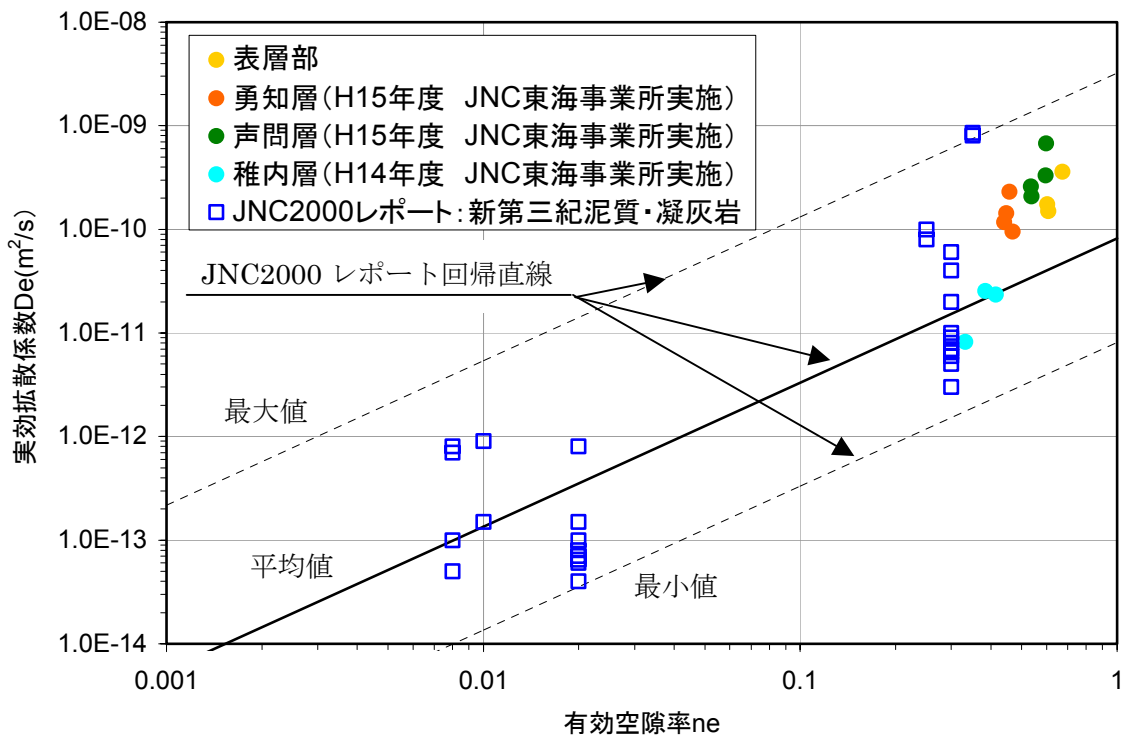


図 3.4- 6 実効拡散係数と有効空隙率との関係 (既往データとの比較)

4. 試験結果のまとめ

表 4.1 に室内試験の結果一覧を示す。以下に室内試験結果についてまとめる。

(1) 透水性

- ① 今回の表層部試料の透水係数は、 8.0×10^{-10} (m/s) ~ 2.0×10^{-9} (m/s) 程度であり、深部堆積岩試料の試験結果と比較すると、勇知層、声問層の透水性よりもやや大きい値であることが分かった。
- ② 有効空隙率と透水係数の関係について深部堆積岩試料の結果と併せてプロットすると、勇知層を除いた全ての試料について、両者の間に正の相関が見られることが分かった。

(2) 物質移行特性

- ① 今回の表層部試料の実効拡散係数は、 1.5×10^{-10} ~ 3.5×10^{-10} (m²/s) であり、深部堆積岩試料の試験結果と比較すると、勇知層、声問層の値とほぼ同等の値であることが分かった。
- ② 試験結果を有効空隙率と有効拡散係数の関係について整理すると、今回の試験結果は、既往の結果と比べると、平均的な値よりもやや大きい値を示しているが、ほぼ同一のトレンドを示すことが分かった。

表 4.1 室内試験結果一覧

試験方法		測定項目	単位	採取孔名		
				H16-1-02孔	H16-1-07孔	H16-1-15孔
基本物性試験	寸法測定	寸法	cm	φ 49.4 × L52.0	φ 49.0 × L37.2	φ 48.3 × L49.5
	重量測定	重量	g	155.6	98.8	141.1
	有効空隙率測定	有効空隙率	%	60.2	67.3	60.7
	弾性波速度試験	P波速度	km/s	1.91	1.83	1.95
S波速度		km/s	-	-	-	
透水試験	トランジェントパルス試験	透水係数	m/s	8.46×10^{-10}	8.47×10^{-10}	2.12×10^{-09}
		比貯留係数	1/m	2.08×10^{-05}	1.08×10^{-04}	1.67×10^{-05}
トレーサー試験	拡散試験	実効拡散係数	m ² /s	1.74×10^{-10}	3.58×10^{-10}	1.50×10^{-10}
		分配係数	m ³ /kg	1.00×10^{-04}	2.00×10^{-04}	-1.00×10^{-04}

5. 軟岩中の流れと移行現象の概念モデルの適用性検討

以上、今回得られた試験結果を基に、表層部堆積層における水理、物質移行概念モデルを検討する。今回対象とした試料については、以下のような特性としてまとめられる。

5.1 概念モデル化の検討

- ・ 今回用いた試料については、深部堆積岩試料と比べて軟質であることから、地下水流れに関しては、多孔質体として取り扱うことができる可能性がある。
- ・ 物質移行特性については、マトリクス内の移流、分散、拡散を考慮したモデルが適用されると考えられる。

5.2 物性値の取り扱いに関する検討

- ・ マトリクス内の透水係数については、深部堆積岩の声問層、稚内層（勇知層を除く）を含めて、有効空隙率と透水係数の関係を同様の回帰直線で表すことができる。したがって、当該地域の堆積岩においては（勇知層を除く）、有効空隙率からある程度の透水性を推定することができる可能性がある。
- ・ 拡散係数については、深部堆積岩の声問層、勇知層と同様の値を示し、有効空隙率と拡散係数の関係において、既往のデータと同様の回帰直線で表すことができる可能性がある。

6. おわりに

本報告書では、表層部堆積層を対象として実施した室内実験（透水試験、トレーサー試験など）ならびに概念モデル化に関する検討について取りまとめた。

室内試験では、幌延深地層研究センターの試錐孔（H16-1-02、H16-1-07、H16-1-15）で採取された表層コア試料について、基本的な物性を測定するとともに、透水試験、拡散試験を実施し、水理・物質移行に関わるデータを取得した。また、昨年度までに核燃料サイクル開発機構東海事業所で実施された深部堆積岩試料（勇知層、声問層、稚内層）の試験結果との比較を行い、得られた知見についてまとめた。その結果、表層部の透水係数は、 8.0×10^{-10} (m/s) ～ 2.0×10^{-9} (m/s) 程度であり、勇知層、声問層の透水性よりもやや大きい値であることが分かった。また、実効拡散係数は、 1.5×10^{-10} ～ 3.5×10^{-10} (m²/s) であり、勇知層、声問層の値とほぼ同等の値であることが分かった。

参考文献

- [1] Brace, W.F., et al : “Permeability of Granite under High Pressure”, J. of Geophysical Research, Vol.73, No.6, pp.2225-2236, (1968)
- [2] Hsieh, P.A., et al : “Transient Laboratory Method for Determining the Hydraulic Properties of ‘Tight’ Rocks – I Theory”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. , Vol. 18, pp.245-252, (1981)
- [3] 青木智幸、井尻裕二、下茂道人 : “高精度トランジェントパルス透水試験機の開発”、土木学会第 49 回年次学術講演会、pp.80-81、(1994).
- [4] 核燃料サイクル開発機構 : “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—”、分冊 3 地層処分システムの安全評価、核燃料サイクル開発機構、JNC TN1400 99-023、(2000).
- [5] 下茂道人、熊本創 : “亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象に関する研究 (II)” 核燃料サイクル開発機構技術資料 (研究委託報告書、大成建設株式会社)、JNC TJ8400 2004-011、(2004).
- [6] Mavko,G, T. Mukerji, Dvorkin, J.: “The rock physics handbook ; tools for seismic analysis in porous media”, Cambridge University Press, (1998).
- [7] 西山勝栄、中嶋悟、多田隆治、内田隆 : “岩石間隙水中のイオンの拡散と間隙の性質”、鉱山地質、40、pp.323-336、(1990).
- [8] 喜多治之、岩井孝幸、中嶋悟 : “花崗岩および凝灰岩間隙水中のイオンの拡散係数の測定”、応用地質、第 30 巻、第 2 号、pp.26-32、(1989).